干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

基于SRP概念模型的祁连山地区生态脆弱性评价

刘佳茹， 赵 军， 沈思民， 赵彦军
（西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：基于生态敏感性–生态恢复力–生态压力度（SRP）概念模型，从地形、气候、植被和社会经济因子选取8个评价指标，利用遥感和GIS技术，采用主成分分析方法求取权重，对祁连山地区启动水源涵养区生态环境保护和综合治理规划研究前后近10 a的生态脆弱性程度进行系统、定量地评估，旨在揭示生态脆弱性的分布特征、时空演变及动因，为区域生态保护、资源利用和可持续发展提供参考。结果表明：（1）从研究区生态脆弱性分布来看，祁连山地区主要以轻度和重度脆弱为主，脆弱性程度从西北向东南地区逐渐减弱，西北地区植被覆盖度小，海拔高，生态环境较为恶劣是导致脆弱性程度较高的原因；（2）祁连山地区3期生态脆弱程度呈逐渐下降趋势，综合指数分别为3.307、3.118和3.103；2005年生态脆弱性较高，极度脆弱面积为28 610 km^2，2010年下降为11 723 km^2，2015年降低为6 174 km^2，极度脆弱面积逐渐减少；（3）从祁连山地区生态脆弱性演变动因来看，8个指标对生态脆弱性影响均较为显著，但在不同的时间影响程度各不相同，2005—2015年3期数据中对生态脆弱性影响最大的均为植被指数，降水次之，地形因子影响最小。总体来看，近年来祁连山地区生态脆弱性程度有所降低，但仍然需要加强保护力度，促进生态环境可持续发展。

关 键 词： 生态脆弱性；SRP概念模型；生态遥感；主成分分析；祁连山地区
文章编号：

生态脆弱性是指在一定的时空尺度下生态环境和构成要素受到外界压力影响而引起的敏感性和压力度，当状态超出自身恢复力时很难恢复到本来的状态并朝着不利方向发展[1-2]。近几10 a全球社会经济发展快速，使气候发生极大变化，对生态环境造成破坏，使生态系统失衡产生强烈反馈，危害了人类生存环境并不利于社会可持续发展[3]。由于生态环境自身内部变化，人口密度增大、对自然资源不合理利用等外界压力，使得生态系统的敏感性和暴露度增强，恢复力及适应力不断下降，生态环境呈现出越来越脆弱的态势。关于生态脆弱性的定义目前并未明确，但普遍认为主要由自然脆弱性和胁迫脆弱性2个方面构成[4]。生态脆弱性评价目的是对地区生态系统问题进行诊断，识别脆弱性驱动因子，根据生态脆弱性分布特征及演变规律，治理并重建生态环境，使生态系统保持平衡。因此，评价生态脆弱性对保护改善地区生态环境和维护良好的人地关系具有重要的理论和现实意义，同时对实现区域可持续发展提供条件[5-8]。

许多专家学者对全球不同区域的“生态脆弱性”进行了广泛研究[8-11]。祁连山地区是西北干旱半干旱地区的生态保护功能区及河西多条内陆河的发源地，近年来社会经济的快速发展使人地关系紧张且对祁连山地区生态环境的影响加剧，加之祁连山大陆性气候特征，降水量少，气候干燥，因此该地区内部生态环境脆弱且自然恢复能力低[12]。以往对祁连山地区生态评价方面主要是对祁连山部分地区研究，时间较为单一。2008年11月国家在《国务院关于支持青海等省藏区经济社会发展的若干意见》中明确提出了关于启动祁连山地区的生态

收稿日期：2019-10-10； **修订日期：**2020-02-06
基金项目：国家自然科学基金项目（41661084，41661005）
作者简介：刘佳茹（1991-），女，硕士研究生，研究方向为环境遥感与GIS应用. E-mail: 943379964@qq.com
通讯作者：赵军（1963-），男，教授，博士生导师，研究方向为生态环境遥感与GIS应用. E-mail: zhaojun@nwnu.edu.cn

保护及综合治理研究规划。自出台相关规定并实施前后的生态脆弱性评价对比分析研究较少。为了对治理前及治理中期的祁连山地区生态脆弱性评价进行对比分析,因此,开展2005年、2010年和2015年3期祁连山地区生态脆弱性评价,并对其演变规律和驱动因素进行定量分析。

本研究基于生态敏感度-生态恢复力-生态压力度(SRP)概念模型选取评价指标,利用主成分分析(PCA)方法求取各指标权重,系统、定量地对祁连山地区生态脆弱性程度进行评估,旨在揭示生态脆弱性的空间分布特征以及时空演变特征和驱动机制,为祁连山地区生态治理和保护提供决策依据。

1 研究区概况

祁连山地区位于青藏高原、蒙新高原和黄土高原交汇带,跨越甘肃省西部和青海省东北部边境(35.5°~40°N,95°~104°E),由多条西北至东南走向平行山脉和其形成的宽阔谷地组成(图1)。祁连山地区地理位置特殊,东起乌鞘岭,南靠茶卡-共和盆地及柴达木盆地,西至当金山口,北临河西走廊,东西向长约800 km,南北宽约300 km[13],地势险峻由东北向西南逐渐升高。祁连山地区是典型高原大陆性荒漠气候,年降水量为400~700 mm,由东向西逐渐减少,年降水夏季多且湿润,冬季降水少且干燥。主要以山区降水和冰川融水为西北地区多条内陆河提供水源补给。植被类型多种多样,遵循垂直地带性规律[14]。受中高纬西风环流、青藏高原和东亚季风的共同影响,祁连山地区生态环境脆弱[15]。

2 评价指标体系与方法

2.1 评价指标的选择及数据源

SRP模型是依据生态系统稳定性而构建的一种综合性评价模型[16]。系统内部具有不稳定的框架结构,对于外界干扰会表现出敏感性,同时会因缺乏应对能力而向不利于自身发展的方向演变。在进行生态脆弱性评价的研究中应用广泛。本文参考其他学者对干旱地区生态脆弱性评价、生态脆弱性时空分异研究等指标体系的选取,结合祁连山地区生态脆弱性的主要成因和表现,构建了包括生态恢复力、生态敏感性和生态压力度的标准层(表1)。生态敏感性因子包含地形因子和气象因子。生态恢复力指生态系统受到内部扰动时的自我恢复能力,用最大值合成法得到的植被指数表示。生态压力度指受到外界干扰时生态系统产生的生理效应,用人口密度和人均GDP表示[17]。本文生态脆弱性评价指标体系及数据源见表1。

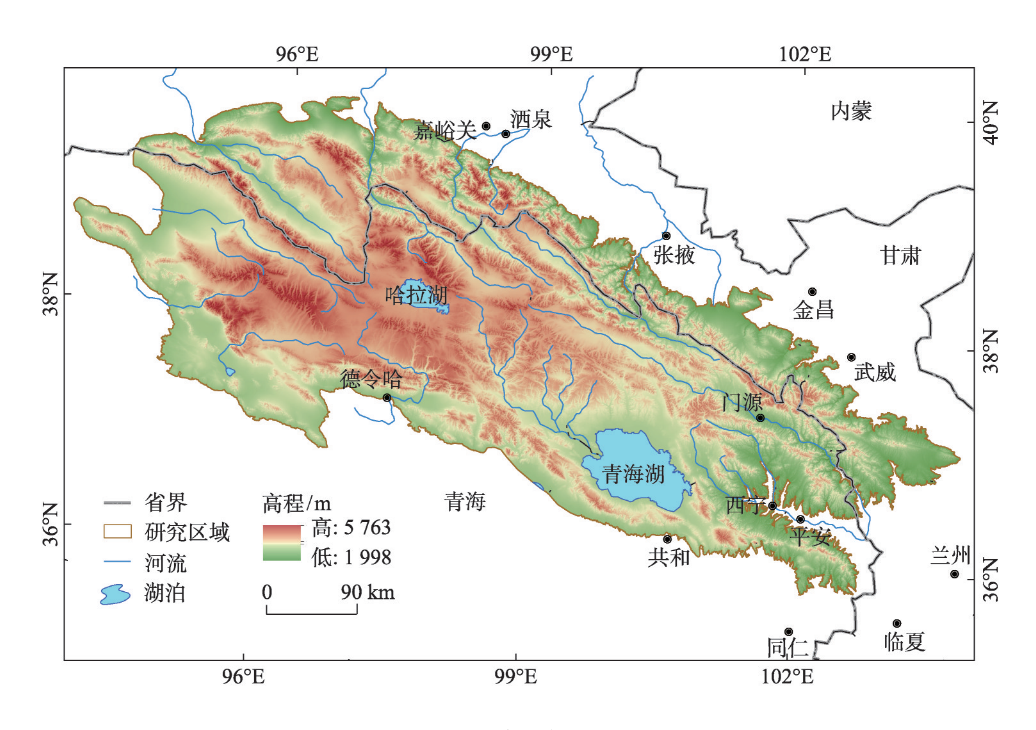


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview of the study area

表1 祁连山地区生态脆弱性评价指标体系及数据源

Tab. 1 Evaluation index system and data sources of ecological vulnerability in Qilian Mountains

目标层	准则层	要素层	指标层	数据源	空间分辨率
祁连山生态脆弱性评价	生态敏感度	地形因子	地形起伏度	STRM/DEM	1 km
			地表破碎度	STRM/DEM	1 km
			地表粗糙度	STRM/DEM	1 km
		气候因子	气温	中国科学院资源环境科学数据中心	1 km
			降水	NASA	1 km
	生态恢复力	植被因子	归一化植被指数*NDVI*	MODIS/MYD13A3	1 km
	生态压力度	社会经济因子	人口密度	中国科学院资源环境科学数据中心	1 km
			人均GDP	中国科学院资源环境科学数据中心	1 km

2.2 生态脆弱性评价方法

2.2.1 评价指标数据标准化 各评价指标具有不同的量纲及物理意义差异，对各评价指标进行数据标准化处理。本研究所用指标与生态脆弱性存在正向和负向2种关系。因此，正向指标式(1)和负向指标式(2)采用不同的标准化计算公式[18-19]：

$$Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{1}$$

$$Z_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \tag{2}$$

式中：Z_i为第i个指标标准化处理值；X_i为第i个原指标值；$X_{\max}$为第i个指标最大值；$X_{\min}$为第i个指标最小值。

2.2.2 计算生态脆弱性指数方法 利用数学模型评估各指标对生态脆弱性的影响，综合各指标计算生态脆弱性指数（Ecological Vulnerability Index，*EVI*）来量化研究区生态脆弱性程度。采用主成分分析（PCA）法进行计算。贡献率计算公式如下：

$$w_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^{n} \lambda_i} \tag{3}$$

式中：w_i为第i个主成分贡献率；λ_i为第i个主成分特征值。

根据主成分累计贡献率达85%以上的标准，从8个指标中提取前3个主成分，在完成主成分分析的基础上，求算生态脆弱性指数（*EVI*），计算公式如下[19-24]：

$$EVI = \sum_{i=1}^{n} Y_i \times w_i \tag{4}$$

式中：*EVI*为生态脆弱性指数；Y_i为第i个主成分；w_i为第i个主成分相应的贡献率。

2.2.3 生态脆弱性分级及生态脆弱性综合指数 为了利于生态脆弱性的度量，同时为使不同年份之间的结果具有可比性，将生态脆弱性指数进行标准化处理。标准化计算方法如下[25-26]：

$$SI_i = \frac{EVI_i - EVI_{\min}}{EVI_{\max} - EVI_{\min}} \tag{5}$$

式中：SI_i为第i年的生态脆弱性指数的标准化值，变化范围为0~1；EVI_i为第i年的生态脆弱性指数的实际值；$EVI_{\max}$为生态脆弱性指数的最大值；$EVI_{\min}$为生态脆弱性指数的最小值。

依据研究区生态特征，并参照国内外已有的生态脆弱性评价研究的评价标准[27-28]，将祁连山地区的生态脆弱性（*EVI*）分为5个等级，即1:微度脆弱（0~0.2），2:轻度脆弱（0.2~0.4），3:中度脆弱（0.4~0.6），4:重度脆弱（0.6~0.8），5:极度脆弱（0.8~1）。

使用定量的综合性指数能够更加直观地表示生态脆弱性状态。采用乘算模型对生态脆弱性综合指数（Ecological Vulnerability Synthetic Index，*EVSI*）进行求算，计算方法如下[19-21]：

$$EVSI = \sum_{i=1}^{n} P_i \times \frac{A_i}{S} \tag{6}$$

式中：*EVSI*为综合指数；P_i为第i类脆弱性等级值；A_i为第i类脆弱性面积；S为区域总面积。

2.3 生态脆弱性空间分异分析方法

本文使用ArcGIS10.2中栅格计算器对2005年、2010年和2015年生态脆弱性分级图进行叠加运算，提取3期生态脆弱性变化动态图斑[10,29]，计算公式为：

$$Code = Code_{2005} \times 100 + Code_{2010} \times 10 + Code_{2015} \tag{7}$$

式中：*Code*为3期生态脆弱性分级变化类型代码；$Code_{2005}$、$Code_{2010}$和$Code_{2015}$分别为5种生态脆弱性等

级类型代码(1~5),其中1~5分别代表微度、轻度、中度、重度和极度脆弱。

运算后变化类型代码中,百位数为2005年分级类型,十位数为2010年分级类型,个位数为2015年分级类型。

2.4 生态脆弱性演变动因分析方法

地理探测器在分析时空演变格局及驱动机制等方面应用十分广泛[30]。为进一步探究祁连山地区生态脆弱性的时空分布及演变规律,本文引入地理探测器[30-32]方法中的因子探测器和交互作用探测器探究祁连山地区生态脆弱性主导因素及主要驱动机制。根据因子探测器所得结果中的q值和p值得出各指标对生态脆弱性指数的影响力及解释力,q值越大说明影响力越大,p值越大说明解释力越小[33-34]。其中,因子探测器主要是探测各评价指标对区域生态脆弱性的影响力大小,计算公式为:

$$P_{D,H}=1-\frac{1}{n\delta^2}\sum_{h=1}^{L}n_h\delta_h^{\,2} \tag{8}$$

式中:$P_{D,H}$为评价指标D对生态脆弱性H的因子解释力;n为样本量;L是评价指标分类数;n_h和δ_h^2分别为h层样本量和生态脆弱性的方差。$P_{D,H}$=[0, 1],值越大说明评价指标D对区域生态脆弱习性的评价指标解释力越强。

3 结果与分析

3.1 祁连山地区生态脆弱性整体特征

对2005年、2010年、2015年3期祁连山地区生态脆弱性评价的8个指标进行主成分分析,结果如表2所示。选取累计贡献率85%以上的3个主成

表2 各主成分的特征值与贡献率和累计贡献率

Tab. 2 Characteristic values and contribution rates and cumulative contribution rates of each principal component

年份		主成分		
		PC1	PC2	PC3
2005年	特征值λ	0.043 75	0.024 32	0.009 90
	贡献率/%	51.99	28.90	11.77
	累计贡献率/%	51.99	80.89	92.66
2010年	特征值λ	0.041 38	0.024 55	0.009 38
	贡献率/%	50.75	30.11	11.50
	累计贡献率/%	50.75	80.86	92.36
2015年	特征值λ	0.042 85	0.024 48	0.008 99
	贡献率/%	51.76	29.56	10.86
	累计贡献率/%	51.76	81.32	92.18

分,根据式(3)得到3期生态脆弱性指数如图2a~c所示。按照生态脆弱性指数分级准则,对3期标准化生态脆弱性综合指数进行分级,得到生态脆弱性分级图,如图2d~f所示。

祁连山地区2005—2015年生态脆弱性指数在0.18~1.15之间,多年平均值为0.72,整体处于重度脆弱。从图2a~c中可以看出,祁连山地区生态脆弱性综合指数总体分布趋势是西北高,东南低,西北地区海拔高,植被覆盖度低,气候较为恶劣导致生态脆弱性较高。从图2d~f中通过计算祁连山地区生态脆弱性等级结果进行面积统计,2005—2015年3期生态脆弱性基本处于轻度脆弱水平、中度脆弱水平以及重度脆弱水平之间。从表3可以看出3期数据中重度脆弱面积占比最大,分别为39.69%、44.81%、42.43%,2015年极度脆弱面积较2005年明显减少,轻度脆弱面积和中度脆弱面积逐渐增加。根据式(6)计算得到祁连山地区2005—2015年3期生态脆弱性综合指数(*EVSI*)分别为3.31、3.12、3.10,逐渐下降,生态环境呈轻微转好趋势。

3.2 祁连山地区生态脆弱性时空演变特征

为进一步探究祁连山地区生态脆弱性等级在10 a间随时间变化的空间分布演变情况,由式(7)计算得到10 a间生态脆弱性时空演变格局(图3),统计得出2005—2010年、2010—2015年间各类生态脆弱性等级面积转移矩阵。从表4、表5中可以得到,2005—2010年、2010—2015年生态脆弱性等级面积转移量分别为43 938 km^{2}和39 448 km^2。总体来看,经过国家各种保护制度的建立以及退耕还林还草措施等,祁连山地区生态状况发生好转,且效果较为明显,总体上依据生态脆弱性积极转移面积大于消极转移面积来看,从侧面反映祁连山地区生态有所改善。

3.3 生态脆弱性演变动因分析

因子探测结果表明:2005年、2010年和2015年的p值为0,说明8个评价指标对区域生态脆弱性指数的解释力都很充足;从3期数据q值来看,植被指数和降水q值均大于0.5,对祁连山地区生态脆弱性影响最大,而地形因子q值均小于0.05,对祁连山地区生态脆弱性影响力较小。人均GDP和人口密度的影响力在3 a间逐渐减小,排名变化不明显,说明近年来政府部门加大对祁连山的保护力度,使人为影响因素对祁连山生态脆弱性影响力不大。

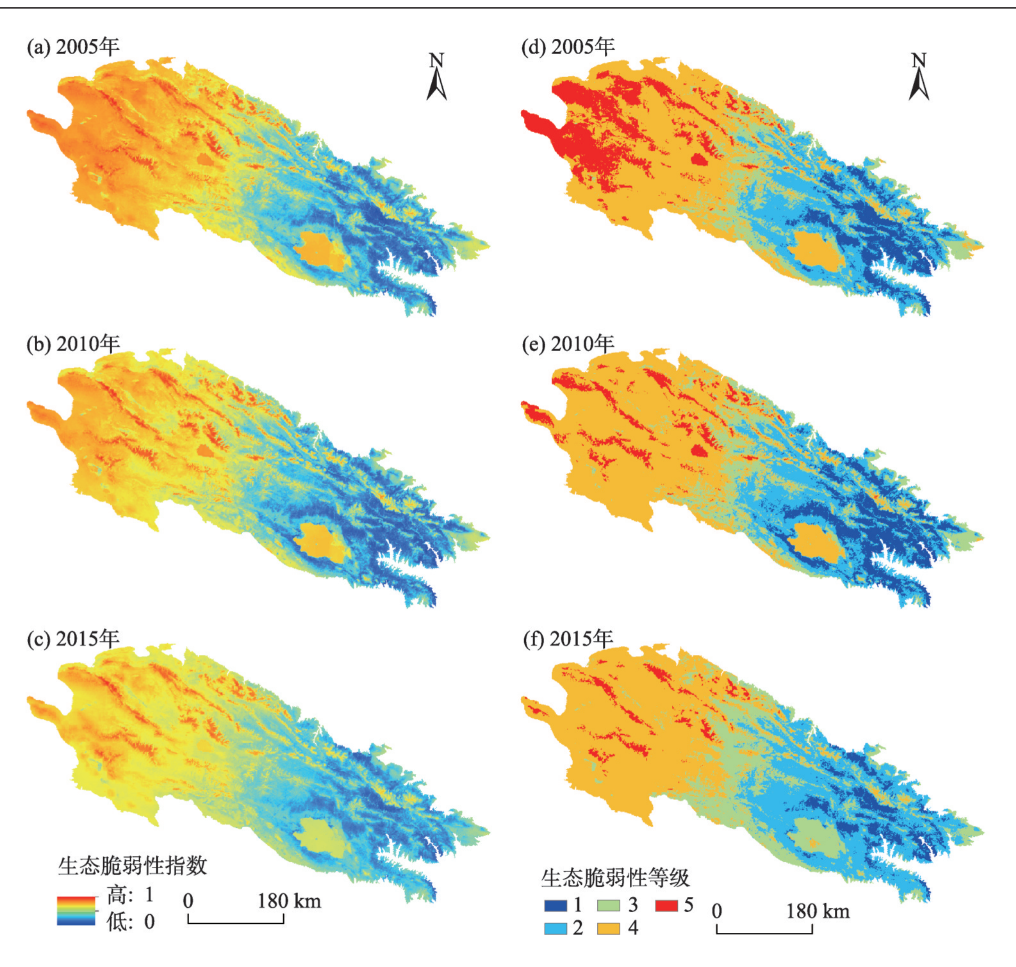


图2 祁连山地区2005—2015年3期生态脆弱性指数分布(a~c)及分级(d~f)图

Fig. 2 Distribution and grading of the ecological vulnerability index of the Qilian Mountains area from 2005 to 2015

表3 2005—2015年祁连山地区不同等级脆弱性面积对比

Tab. 3 Comparison of different levels of vulnerability in Qilian Mountains area from 2005 to 2015

脆弱性分级	2005年		2010年		2015年	
	面积/km²	面积百分比/%	面积/km²	面积百分比/%	面积/km²	面积百分比/%
微度脆弱	16 807	8.77	22 725	11.86	11 034	5.76
轻度脆弱	40 880	21.33	41 228	21.51	51 783	27.02
中度脆弱	29 277	15.28	30 077	15.70	41 336	21.57
重度脆弱	76 055	39.69	85 876	44.81	81 302	42.43
极度脆弱	28 610	14.93	11 723	6.12	6 174	3.22

交互探测结果表明(表6):各因子具有交互协同作用,显示2个因子共同作用时会使生态脆弱性发生变化。由于植被指数与降水作为单因子中解释力最强的2个因子,在从2005—2015年3期数据中可以看出,与其他因子交互后q值均大于0.5,尤其是植被指数与气温交互后解释力度最强,降水与气温交互后q值均大于0.7,解释力也较大,进一步说明降水和植被指数为祁连山地区生态脆弱性的主要驱动因子。可以看出植被、暖湿气候为生态发展提供了良好的自然条件,政府部门需要加强科技支撑,完善保护制度,加大投入力度,强化生态建设基础保障,从而根本治理和改善祁连山地区的生态环境。

4 讨 论

祁连山地区生态脆弱性总体分布上呈现西北高、东南低的态势,轻度、中度和重度脆弱面积占总面积比重较大。作为我国西北重要的生态安全屏障,近年来由于全球气候变暖和人类不合理开发利

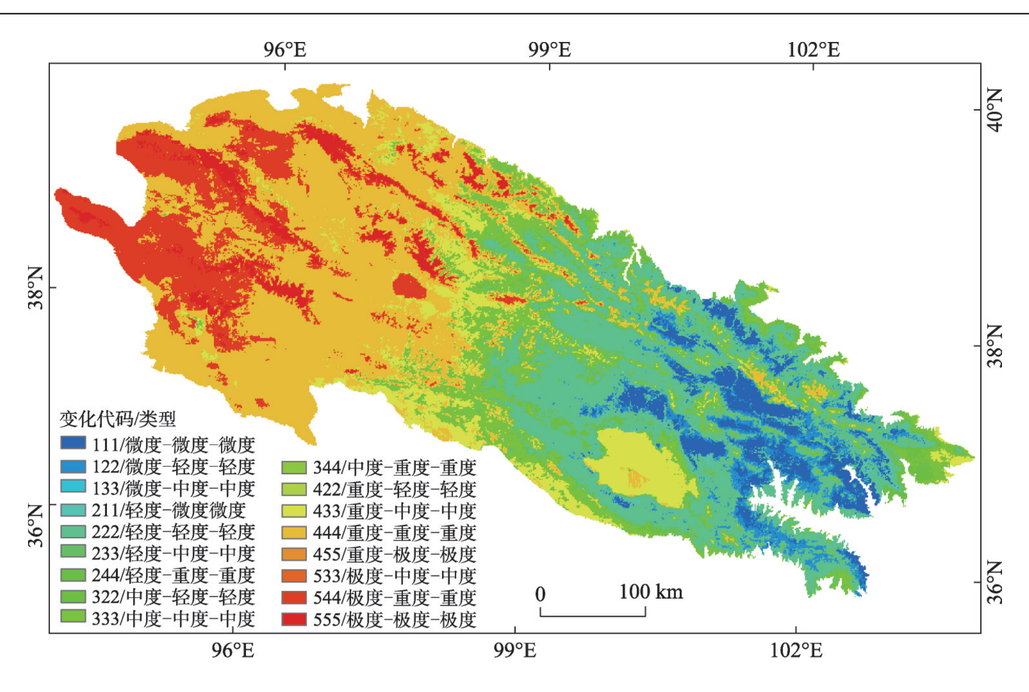


图3 祁连山地区生态脆弱性时空演变格局

Fig. 3 Temporal and spatial evolution pattern of ecological vulnerability in Qilian Mountains

表4 2005—2010年祁连山地区不同生态脆弱性等级面积转移矩阵

Tab. 4 Different ecological vulnerability level transfer matrix in Qilian Mountains area from 2005 to 2010 /km²

脆弱性等级		2005年					2010年总计	变化量
		微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱		
2010年	微度脆弱	14 929	7 796	0	0	0	22 725	7 796
	轻度脆弱	1 877	32 130	7 212	7	2	41 228	9 098
	中度脆弱	1	951	21 375	7 747	3	30 077	8 702
	重度脆弱	0	3	689	67 918	17 266	85 876	17 958
	极度脆弱	0	0	1	383	11 339	11 723	384
	2005年总计	16 807	40 880	29 277	76 055	28 610	191 629	—
	转移量	1 878	8 750	7 902	8 137	17 271	—	43 938

表5 2010—2015年祁连山地区不同生态脆弱性等级面积转移矩阵

Tab. 5 Different ecological vulnerability level transfer matrix in Qilian Mountains area from 2010 to 2015 /km²

脆弱性等级		2010年					2015年总计	变化量
		微度脆弱	轻度脆弱	中度脆弱	重度脆弱	极度脆弱		
2015年	微度脆弱	10 041	992	1	0	0	11 034	993
	轻度脆弱	12 681	36 182	2 905	15	0	51 783	15 601
	中度脆弱	3	4 051	25 863	11 412	7	41 336	15 473
	重度脆弱	0	3	1 308	74 185	5 806	81 302	7 117
	极度脆弱	0	0	0	264	5 910	6 174	264
	2010年总计	22 725	41 228	30 077	85 876	11 723	191 629	—
	转移量	12 684	5 046	4 214	11 691	5 813	—	39 448

用，祁连山生态环境严重恶化，水资源涵养能力减弱，造成生态系统失衡。祁连山西北部由于冰川退缩、积雪消融，海拔高植被稀疏等因素，生态系统脆弱，脆弱性程度高。东南部随着国家退耕还林、水源涵养生态区保护等政策实施，植被长势良好且生态环境得到有效保护，生态状况较好，脆弱性程度低。从3期生态脆弱性空间分布特征、演变规律来看，自国家出台关于祁连山地区的生态保护与治理

表6 交互因子对祁连山地区生态脆弱性的影响

Tab. 6 Influence of interaction factors on ecological vulnerability of Qilian Mountains

交互因子	2005年	2010年	2015年
	P(X1∩X2)	P(X1∩X2)	P(X1∩X2)
地形起伏度∩地表破碎度	0.033	0.031	0.020
地形起伏度∩地表粗糙度	0.030	0.029	0.018
地形起伏度∩降水	0.679	0.552	0.701
地形起伏度∩人口密度	0.220	0.287	0.174
地形起伏度∩气温	0.144	0.204	0.295
地形起伏度∩植被指数	0.941	0.941	0.916
地形起伏度∩人均GDP	0.297	0.243	0.152
地表破碎度∩地表粗糙度	0.027	0.026	0.017
地表破碎度∩降水	0.677	0.545	0.703
地表破碎度∩人口密度	0.219	0.287	0.175
地表破碎度∩气温	0.145	0.205	0.295
地表破碎度∩植被指数	0.941	0.941	0.916
地表破碎度∩人均GDP	0.298	0.239	0.152
地表粗糙度∩降水	0.661	0.530	0.687
地表粗糙度∩人口密度	0.208	0.277	0.169
地表粗糙度∩气温	0.096	0.154	0.260
地表粗糙度∩植被指数	0.939	0.939	0.902
地表粗糙度∩人均GDP	0.288	0.221	0.147
降水∩人口密度	0.673	0.576	0.717
降水∩气温	0.773	0.706	0.825
降水∩植被指数	0.950	0.940	0.913
降水∩人均GDP	0.692	0.594	0.717
人口密度∩气温	0.252	0.351	0.317
人口密度∩植被指数	0.944	0.944	0.895
人口密度∩人均GDP	0.309	0.288	0.167
气温∩植被指数	0.955	0.961	0.935
气温∩人均GDP	0.345	0.311	0.301
植被指数∩人均GDP	0.946	0.942	0.893

相关规划后，祁连山地区生态状况总体上呈轻微转好趋势。从因子探测结果来看，植被指数和降水对生态脆弱性影响最大，地形因子影响最小。为进一步加强祁连山地区生态保护与治理，有效恢复生态功能，根据区域生态状况进行有效合理的规划，完善保护管理机制，在生态维护与治理方面提供支持。为了更全面的表征祁连山地区的生态脆弱性评价及演变动因分析，在后续研究中考虑通过更为科学全面的方法，选取更多适宜的指标，综合不同赋权方法求取指标权重，验证评价结果。

5 结 论

本文选取了8个评价指标，根据空间主成分分析方法，自2008年出台相关政策前后对祁连山地区生态脆弱性时空分布特征及演变进行分析，利用地理探测器探测主要驱动因子及驱动机制，得到以下结论：

（1）空间上，祁连山地区生态脆弱性总体分布趋势为西北高，东南低，中部地区偏中度脆弱，脆弱性程度由西北地区向东南地区逐渐降低；时间上，2005—2015年祁连山地区生态脆弱性综合指数逐渐降低，向良好趋势发展。

（2）从祁连山地区生态脆弱性时空演变特征来看，主要以重度和轻度脆弱为主，高脆弱区主要位于高寒地区，低脆弱区主要位于低海拔及靠近城镇地区。从2008年开始对祁连山地区进行生态治理和保护，近10 a间，生态脆弱性整体上呈缓慢降低趋势，生态状况呈轻微转好趋势。

（3）从祁连山地区生态脆弱性演变动因来看，各指标对生态脆弱性的影响均较为显著，植被指数和降水对生态脆弱性的影响程度最大，气温及人口密度和人均GDP影响程度居中，地形因子影响最小。任意两种因子发生交互作用后解释力度均大于单因子解释力度，说明多因子交互作用造成祁连山地区生态脆弱。

参考文献（References）

[1] 徐广才, 康慕宜, 贺丽娜, 等. 生态脆弱性及其研究进展[J]. 生态学报, 2009, 29(5): 2578-2588. [XU Guangcai, KANG Muyi, HE Lina, et al. Advances in research on ecological vulnerability[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(5): 2578-2588.]

[2] 张笑楠, 王克林, 张伟, 等. 桂西北喀斯特区域生态环境脆弱性[J]. 生态学报, 2009, 29(2): 749-757. [ZHANG Xiaonan, WANG Kelin, ZHANG Wei, et al. The quantitative assessment of eco-environment vulnerability in Karst regions of northwest Guangxi[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 749-757.]

[3] 孟岩, 赵庚星. 基于卫星遥感数据的河口区生态环境状况评价——以黄河三角洲垦利县为例[J]. 中国环境科学, 2009, 29(2): 163-167. [MENG Yan, ZHAO Gengxing. Ecological environmental condition evaluation of estuarine area based on quantitative remote sensing: A case study in Kenli County[J]. China Environmental Science, 2009, 29(2): 163-167.]

[4] 王小丹, 钟祥浩. 生态环境脆弱性概念的若干问题探讨[J]. 山地学报, 2003, (21): 21-25. [WANG Xiaodan, ZHONG Xianghao. Approaches to concept of vulnerability of ecology and environment [J]. Journal of Mountain Science, 2003, (21): 21-25.]

[5] 毕晓丽, 葛剑平. 基于地形和土壤的泾河流域植被生态系统保

水效益分析[J]. 生态学杂志, 2009, 28(1): 95-101. [BI Xiaoli, GE Jianping. Vegetation water conservation effect in the Jinghe River Basin: An analysis based on topography and soil type[J]. China Journal of Ecology, 2009, 28(10): 95-101.]

[6] 靳毅, 蒙吉军. 生态脆弱性评价与预测研究进展[J]. 生态学杂志, 2011, 30(11): 2646-2652. [JIN Yi, MENG Jijun. Assessment and forecast of ecological vulnerability: A review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, 30(11): 2646-2652.]

[7] NELSON R, KOKIC P, CRIMP S, et al. The vulnerability of Australian rural communities to climate variability and change: Part I—Conceptualising and measuring vulnerability[J]. Environmental Science & Policy, 2010, 13(1): 18-27.

[8] 高江波, 侯文娟, 赵东升, 等. 基于遥感数据的西藏高原自然生态系统脆弱性评估[J]. 地理科学, 2016, 36(4): 580-587. [GAO Jiangbo, HOU Wenjuan, ZHAO Dongsheng, et al. Comprehensive assessment of natural ecosystem vulnerability in Tibetan Plateau based on satellite-derived datasets[J]. Scientia GeographicaSinica, 2010, 36(4): 580-587.]

[9] 刘晶, 刘学录, 侯莉敏. 祁连山东段山地景观格局变化及其生态脆弱性分析[J]. 干旱区地理, 2012, 35(5): 795-805. [LIU Jing, LIU Xuelu, HOU Limin. Changes and ecological vulnerability of landscape pattern in eastern Qilian Mountain[J]. Arid Land Geography, 2012, 35(5): 795-805.]

[10] 郭泽呈, 魏伟, 庞素菲, 等. 基于SPCA和遥感指数的干旱内陆河流域生态脆弱性时空演变及动因分析——以石羊河流域为例[J]. 生态学报, 2019, 39(7): 1-14. [GUO Zecheng, WEI Wei, PANG Sufei, et al. Spatio-temporal evolution and motivation analysis of ecological vulnerability in arid inland river basin based on SPCA and remote sensing index: A case study on the Shiyang River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): 1-14.]

[11] 马真臻, 王忠静, 顾艳玲, 等. 中国西北干旱区自然保护区生态脆弱性评价——以甘肃西湖、苏干湖自然保护区为例[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 253-259. [MA Zhenzhen, WANG Zhongjing, GU Yanling, et al. Ecological vulnerability assessment of nature reserve in arid region of northwest China: A case study of the Xihu Nature Reserve and the Suganhu Nature Reserve in Gansu[J]. Journal of Desert Research, 2015, 35(1): 253-259.]

[12] 朱瑜馨, 赵军, 曹静. 祁连山山地生态系统稳定性评估模型[J]. 干旱区研究, 2002, 19(4): 33-37. [ZHU Yuxin, ZHAO Jun, CAO Jing. Study on the assessing model of stability of the mountainous ecosystem in the Qilian Mountain[J]. Arid Zone Research, 2002, 19(4): 33-37.]

[13] 孙美平, 刘时银, 姚晓军, 等. 近50年来祁连山冰川变化——基于中国第一、二次冰川编目数据[J]. 地理学报, 2015, 70(9): 1402-1414. [SUN Meiping, LIU Shiyin, YAO Xiaojun, et al. Glacier changes in the Qilian Mountains in the past hail century: Based on the revised First and Second Chinese Glacier Inventory [J]. Acta Geographica Sinica, 2015, 70(9): 1504-1414.]

[14] 贾文雄, 陈京华. 1982—2014年祁连山植被生长季NDVI变化及其对气候的响应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(2): 264-268 [JIA Wenxiong, CHEN Jinghua. Variations of NDVI and its response to climate change in the growing season of vegetation in Qilianshan Mountains from 1982—2014[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(2): 264-268.]

[15] 田沁花, 周秀骥, 勾晓华, 等. 祁连山中部近500年来降水重建序列分析[J]. 中国科学: 地球科学, 2012, 42(4): 536-544. [TIAN Qinhua, ZHOU Xiuji, GOU Xiaohua, et al. Analysis of reconstructed annual precipitation from tree-rings for the past 500 years in the middle Qilian Mountains[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2012, 42 (4): 536-544.]

[16] ZHANG R, LIU X, HEATHMAN G C, et al. Assessment of soil erosion sensitivity and analysis of sensitivity factors in the Tongbai-Dabie mountainous area of China[J]. Catena, 2013, 101: 92-98.

[17] 刘正佳, 于兴修, 李蕾, 等. 基于SRP概念模型的沂蒙山生态环境脆弱性评价[J]. 应用生态学报, 2011, 22(8): 2084-2090. [LIU Zhengjia, YU Xingxiu, LI Lei, et al. Vulnerability assessment of eco-environment in Yimeng mountainous area of Shandong Province based on SRP conceptual model[J]. China Journal of Applied Ecology, 2011, 22(8): 2084-2090.]

[18] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 295-304. [TIAN Fengshou, LIU Xinping, YUAN Weipeng. Ecological risk assessment of cultivated non-point source pollution in Hetan Prefecture, Xinjiang[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 295-304.]

[19] 马骏. 三峡库区重庆段生态脆弱性动态评价[D]. 重庆: 西南大学, 2014. [MA Jun. Dynamic evaluation of ecological vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Section, China [D]. Chongqing: Southwest University, 2014.]

[20] LI A, WANG A, LIANG S, et al. Eco-environmental vulnerability evaluation in mountainous region using remote sensing and GIS: A case study in the upper reaches of Minjiang River, China[J]. Ecological Modelling, 2006, 192(1-2): 175-187.

[21] WANG S Y, LIU J S, YANG C J. Eco-environmental vulnerability evaluation in the Yellow River Basin, China[J]. Pedosphere, 2008, 18(2): 171-182.

[22] 黄方, 刘湘南, 张养贞. GIS支持下的吉林省西部生态环境脆弱态势评价研究[J]. 地理科学, 2003, 23(1): 95-100. [HUANG Fang, LIU Xiangnan, ZHANG Yangzhen. GIS-based eco-environmental vulnerability evaluation in west Jilin Province[J]. Scientia Geographica Sinica, 2003, 23(1): 95-100.]

[23] 艾沙江·艾力, 徐海量, 苑塏烨. 基于主成分分析法和监测数据的阿尔泰山采金废弃矿区人工恢复措施效益分析[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 288−294. [AILI Aishajiang, XU Hailiang, YUAN Kaiye. Assessment of the effects of artificial restoration measures in abandoned gold mining area in Altay Mountains using PCA and monitoring data[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 288−294.]

[24] 廖炜, 李璐, 吴宜进, 等. 丹江口库区土地利用变化与生态环境脆弱性评价[J]. 自然资源学报, 2011, 26(11): 1879−1889. [LIAO Wei, LI Lu, WU Yijin, et al. Land use change and eco-environmental vulnerability evaluation in the Danjiangkou Reservoir area [J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(11): 1879−1889.]

[25] 徐涵秋. 区域生态环境变化的遥感评价指数[J]. 中国环境科学, 2013, 33(5): 889−897. [XU Hanqiu. A remote sensing index for assessment of regional ecological changes[J]. China Environmental Science, 2013, 33(5): 889−897.]

[26] 赵伟, 谢德体, 刘洪斌. 基于PSR的重庆市"一小时经济圈"生态环境评价研究[J]. 长江流域资源与环境, 2009, 18(6): 568−573. [ZHAO Wei, XIE Deti, LIU Hongbin. On ecological environment effects based on PSR in Chongqing one hour economic circle region[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2009, 18(6): 568−573.]

[27] 蒙吉军, 张彦儒, 周平. 中国北方农牧交错带生态脆弱性评价——以鄂尔多斯市为例[J]. 中国沙漠, 2010, 30(4): 850−856. [MENG Jijun, ZHANG Yanru, ZHOU Ping. Ecological vulnerability assessment of the farming-pastoral transitional zone in northern China[J]. Journal of Desert Research, 2010, 30(4): 850−856.]

[28] 樊哲文, 刘木生, 沈文清, 等. 江西省生态脆弱性现状GIS模型评价[J]. 地球信息科学学报, 2009, 11(2): 202−208. [FAN Zhewen, LIU Musheng, SHEN Wenqing, et al. GIS-based assessment on eco-vulnerability of Jiangxi Province[J]. Journal of Geo-information Science, 2009, 11(2): 201−208.]

[29] 邓华, 邵景安, 王金亮, 等. 多因素耦合下三峡库区土地利用未来情景模拟[J]. 地理学报, 2016, 71(11): 1979−1997. [DENG Hua, SHAO Jingan, WANG Jinliang, et al. Lang use driving forces and its future scenario simulation in the Three Gorges Reservoir Area using CLUE-S model[J]. Acta Geographica Sinica, 2016, 71 (11): 1979−1997.]

[30] 王鹏, 刘小鹏, 王亚娟, 等. 黄土丘陵沟壑区生态移民过程及其生态系统服务价值评价——以宁夏海源县为例[J]. 干旱区地理, 2019, 42(2): 433−443. [WANG Peng, LIU Xiaopeng, WANG Yajuan, et al. Ecological migration process and the evaluation of its ecosystem service value in Loess hilly and gully region: A case study of Haiyuan County, Ningxia[J]. Arid Land Geography, 2019, 42(2): 433−443.]

[31] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J]. 地球信息科学学报, 2018, 20(7): 947−956. [WANG Yu, HU Baoqing. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang River in Guangxi and its driving mechanism based on GIS[J]. Journal of Geo-information Science, 2018, 20(7): 947−956.]

[32] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [WANG Jingfeng, XU Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116−134.]

[33] 武鹏, 李同昇, 李卫民. 县域农村贫困化空间分异及其影响因素——以陕西山阳县为例[J]. 地理研究, 2018, 37(3): 593−606. [WU Peng, LI Tongsheng, LI Weimin. Spatial differentiation and influencing factors analysis of rural poverty at county scale: A case study of Shanyang County in Shaanxi Province, China[J]. Geographical Research, 2018, 37(3): 593−606.]

[34] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J]. 地理研究, 2018, 37(1): 171−182. [YE Yanjun, QI Qingwen, JIANG Lili, et al. Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector[J]. Geographical Research, 2018, 37(1): 171−182.]

Ecological vulnerability assessment of Qilian Mountains region based on SRP conceptual model

LIU Jia-ru, ZHAO Jun, SHEN Si-min, ZHAO Yan-jun
(*College of Geographical and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou* 730070, *Gansu, China*)

Abstract: Global natural environment changes and increasing human activities have greatly affected the ecological environment, leading to the emergence of many ecological problems and the high attention of the ecological vulnerability. The Qilian Mountains region is an important part of the plateau ecological security barrier in China, which guarantees the ecological security in the northwestern region of China. This region is characterized by the typical continental climate with low rainfall and dry climate, where the ecological environment has been seriously influenced with social and economic development and frequent human activities. In 2008, the government issued relevant plans for the ecological management and restoration of the Qilian Mountains region. Therefore, it is of great significance to evaluate and analyze the ecological vulnerability of the Qilian Mountains region in the three phases of 2005, 2010, and 2015. In this paper, according to the ecological environment characteristics of the Qilian Mountains, the operability and relevance of the evaluation indexes and the "sensitivity-resilience-stress" conceptual model of eight indicators of *NDVI*, topographic fluctuations, ground fragmentation, surface roughness, and topographic factors, as well as precipitation, temperature, meteorological factors, population density, and per capita GDP selected from natural and human aspects, using remote sensing and GIS technology, the principal component analysis method is used to obtain weights and ecological vulnerability Based on the ecological index and the ecological characteristics of the study area, and based on the existing ecological vulnerability assessment standards at home and abroad, the degree of ecological fragility in the Qilian Mountains during the past 10 a is systematically and quantitatively analyzed. The study's aim is to provide references for regional ecological protection, resource utilization, and sustainable development. Results showed that: (1) From the perspective of ecological vulnerability distribution in the study area, the degree of vulnerability is gradually weakened from northwest to southeast. The vegetation coverage in southwest is small and the high altitude and the poor ecological environment is the reason for the high degree of vulnerability. (2) For the ecological vulnerability of the whole region, the Qilian Mountains is mainly characterized by mild and severe vulnerability, and the degree of ecological vulnerability has gradually decreased in the past decade. (3) The ecological vulnerability of Qilian Mountains in 2005 is relatively high with the extremely fragile area of 28 610 km^2, which dropped to 11 723 km^2 in 2010 and 6 174 km^2 in 2015. (4) The ecological vulnerability index of the study area was 3.307 in 2005, 3.118 in 2010 and 3.103 in 2015, showing a gradual decline trend. (5) The impacts of eight indicators on ecological vulnerability are all significant, and the difference is reflected in different periods. The vegetation index has the greatest impact on ecological vulnerability in 2005—2015, followed by precipitation, and the topographic factor has the least impact. In general, the ecological vulnerability of the Qilian Mountains has been reduced in recent years due to the introduction of relevant national plans. There has been some progress in the protection and comprehensive management of ecological environments. However, it is still necessary to strengthen the environmental protection, build the ecological security barrier, maintain the ecological security, and achieve a virtuous cycle of the ecosystem in the Qilian Mountains to promote the harmonious development of human and nature.

Key words: ecological vulnerability; SRP conceptual model; ecological remote sensing; principal component analysis; Qilian Mountains